



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.024

宋鑫华, 包太, 庄锦亮, 等. 基于尖点突变理论的土质边坡稳定性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 138-143, 168. SONG Xir hua, BAO Tai, ZHU ANG Jir liang, et al. Stability analysis of soil slope based on cusp catastrophe theory[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 138-143, 168. (in Chinese)

基于尖点突变理论的土质边坡稳定性分析

宋鑫华, 包太, 庄锦亮, 刘豪, 彭鸿湖

(贵州大学 土木工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 边坡稳定性判断历来是工程的重点内容, 通过实用化的正交设计原理进一步对边坡试验方案进行优化, 采用黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、坡角 β 、坡高 H 、容重 γ 、以及孔隙水压力比 γ_w 六类因素以及相对应的五水平进行试验, 然后通过强度折减法计算边坡的安全系数大小, 最后通过用尖点突变理论中的突变级数法进一步判断分析边坡稳定性, 发现单一基于有限元强度折减法计算安全系数的值来判断边坡稳定性的局限性, 从而得出基于尖点突变理论与有限元强度折减法综合判断边坡稳定性的准确性、实用性。

关键词: 尖点突变; 强度折减法; 正交试验设计; 边坡稳定性

中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0138-06

Stability analysis of soil slope based on cusp catastrophe theory

SONG Xir hua, BAO Tai, ZHUANG Jir liang, LIU Hao, PENG Hong hu

(School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Slope stability judgment is one of the most important aspects of the project. Through the practical application of the principle of orthogonal design to further optimize the slope experiment scheme, six factors including the cohesion of C , internal friction angle φ , slope β , slope height H , bulk density γ , and poisson's ratio γ_w , and related five levels were used in the experiment. Then the safety factor of slope was calculated by strength subtraction. At last, by mutation progression method in the cusp mutation theory, the slope stability was further judged and analyzed. It is found that the slope stability judged and analyzed by the safety factor which was calculated only based on the finite element strength reduction had some limitations, so it was of accuracy and practicability to comprehensively judge the slope stability based on cusp catastrophe theory and finite element strength reduction

Key words: cusp catastrophe; strength reduction method; orthogonal experimental design; slope stability

边坡工程是工程建设过程中一个古老而常新的问题, 边坡失稳引起的滑坡、崩塌灾害带来巨大的生命和财产损失, 故对边坡稳定性研究具有重要的工程实用价值。根据文献[1]可知, 边坡稳定性研究的不确定性主要来自三个方面, 分别是岩土体本身固有的不均匀性、工程参数量测和取样引入的误差、模

型不准确引起的不确定性。工程界广泛采用稳定安全系数这样的安全度指标来进行边坡的稳定性评价, 而传统的极限平衡法计算边坡的稳定性必须先知道边坡的滑动面位置以及形状。虽然均质土坡可以通过相应的优化法^[2]来搜索危险滑动面, 但是其比较繁杂。国内专家学者郑颖人等^[3]提出了采用

收稿日期: 2015-12-06 修回日期: 2016-03-15 网络出版时间: 2016-05-05
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1133.015.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51468008)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51468008)

作者简介: 宋鑫华(1989), 男, 江西婺源人, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: 984017992@qq.com

通讯作者: 包太(1972), 男, 吉林通化人, 教授, 主要从事岩土工程、地基基础的教学、科研和工程实践工作。E-mail: 297918@qq.com

有限元强度折减法对均质土坡进行系统分析,证实其可行性,而在文献[4]中根据3个判据来确定有限元中边坡是否处于整体破坏,分别是以有限元静力平衡计算不收敛作为边坡整体失稳的标志;以塑性区(或者等效塑性应变)从坡脚到坡顶贯通作为边坡整体失稳的标志;土体破坏标志应当是滑动土体无限移动,此时土体滑移面上应变和位移发生突变且无限发展。又有专家学者陈国庆^[5]指出基于强度折减法对边坡稳定性进行分析只能得到单一静态安全参数,并且强度折减法在模拟计算中获得的塑性区过大的问题而采用动态强度折减法对其滑动面进行搜索。肖锐铎等^[6]针对大型边坡的多级滑动面、多个滑动方向的特点采用局部强度折减确定多种破坏模式,更加符合真实的破坏形式。

从以上这些基于强度折减法的运用以及相应的改进来判断边坡的稳定性表明,边坡的整体强度折减法相对应的局限性。由于边坡稳定的影响因素有结构面在边坡破坏中的作用、边坡外形改变对边坡的影响、岩土体力学性质的改变对边坡稳定性的影响、各种外力直接作用对边坡稳定性的影响这四种主要的影响因素。考虑到边坡稳定性的影响因素很多,本文仅考虑边坡本身的物理力学性质对其稳定性的影响,即是理想状态下对土质边坡稳定性的研究,故只考虑土质边坡的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、坡角 β 、坡高 H 、容重 γ 、以及孔隙水压比 γ_w 六类指标。根据正交试验设计原理对这六类指标进行安排实验,利用有限元的强度折减法计算出其边坡稳定性安全系数,然后运用尖点突变理论对边坡稳定性进行定性、定量的分析,最终确定边坡的稳定状态。

1 基本原理

1.1 正交试验设计原理

根据文献[7-8],正交试验设计(Orthogonal experimental design)是研究多因素、多水平的又一种设计方法,此实验是依据正交性原理从所有的试验中挑选出具有代表性的部分点进行试验,且这些点必须具备有“均匀分散,齐整可比”的特点。正交试验是在数理统计、实践经验、以及概率论的基础上,应用标准化正交表安排相关的试验方案,并分析计算试验结果,最后迅速找到优化方案。正交试验设计作为一种科学计算方法,可以高效处理多因素优化问题,涉及到工程的各个领域的研究。

本文针对六个因素、五个水平的试验,假如考虑到每个因素每个水平的全面试验,必须做试验次数

为 $5^6=15\ 625$,根据表1的各因素的水平表情况,采用表2所示的正交表 $L_{25}(5^6)$ 见表2。

表1 具体试验参数的选取

Tab. 1 Selection of specific experimental parameters

因素	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / ($^\circ$)	坡角 β / ($^\circ$)	坡高 H / m	容重 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	孔隙水 压比 γ_w
水平 1	0	0	20	10	16	0.1
水平 2	50	10	30	50	17	0.2
水平 3	100	20	40	100	18	0.3
水平 4	150	30	50	200	19	0.4
水平 5	200	40	60	250	20	0.5

1.2 有限元强度折减法(材料强度储备系数)

根据文献[1-4]:岩土坡沿着某一滑裂面的稳定系数 F_s ,定义为:将岩土体的抗剪强度指标降低为 c'/F_s , $\tan \phi'/F_s$,当沿着此滑裂面的岩土体处处到达极限平衡时对应的折减系数 F_s 即为稳定系数(亦称为材料强度储备系数)。在非线性有限元边坡稳定分析中,通过不断降低岩土 c 、 φ 值,直到破坏,此时的折减系数即是边坡稳定安全系数。

$$c' = c/F_s, \quad \phi' = \arctan(\tan \varphi/F_s)$$

随着计算机技术的不断发展,计算机计算速度提高,使得大型岩土材料的非线性弹塑性有限元软件MADIS/GTS快速发展,基于其强大的前后处理功能越来越强大,故可以采用MADIAS/GTS软件中的基于有限元的强度折减法来计算边坡的稳定安全系数。在应用GTS对边坡稳定性进行三维分析中,采用摩尔-库伦等面积圆准则^[3,4],为了在有限元中实现不同的屈服准则可以通过变换不同的 α 、 k 的表达式,考虑到本文中平面上的摩尔库伦不等角六角形与D-P圆的面积相等的要求,可以选用 α 、 k 的表达式^[3]如下:

$$\alpha = 2\sqrt{3}\sin\varphi\sqrt{2\sqrt{3\pi}(9-\sin^2\varphi)}, \quad k = 6\sqrt{3}c\sin\varphi\sqrt{2\sqrt{3\pi}(9-\sin^2\varphi)}$$

1.3 尖点突变理论

突变级数法^[9,10]是一种对评价目标进行多层次矛盾分解的方法,把模糊数学理论与突变理论相结合求得突变模糊隶属函数,再依据归一公式进行综合量化运算,最后求出总的隶属函数,是一种对评价目标进行排序分析的综合评价方法。该方法取消了指标采用权重的要求,且考虑到各评价指标的相对重要性,从而减少了人为主观性,是一种科学性、合理性的方法,另外具有计算简易准确,应用范围广泛的特点。故本文采用突变级数法,其计算步骤见图1。

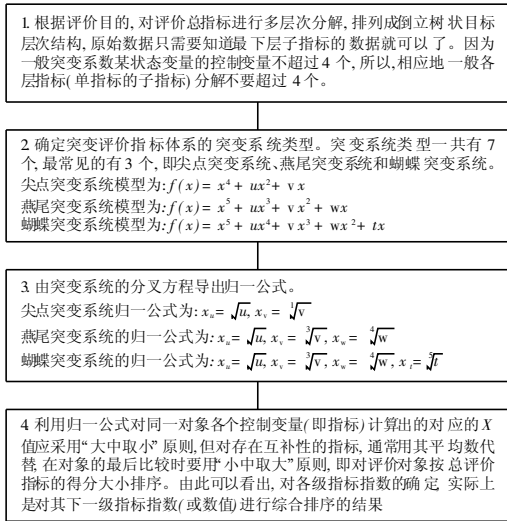


图 1 尖点突变级数 A 计算步骤

Fig. 1 Calculation steps of cusp catastrophe progression A

2 均质土坡稳定性算例分析

2.1 工程算例

均质土坡,按照表 1 中的选取的实验参数分别进行边坡稳定性分析,用 MADIAS/GTS 进行强度折减 SRM 求出其边坡的稳定性安全系数 F_s 。所取的边坡模型见图 2^[3]: 坡顶到右端边界的距离为坡高的 2.5 倍,坡角到左端边界的距离为坡高的 1.5 倍,且上下边界总高大于 2 倍坡高时,计算得到的精度将更加准确理想。

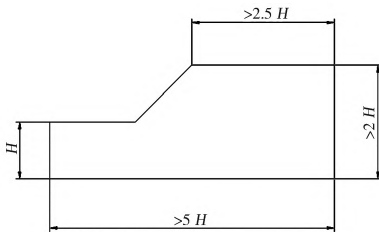


图 2 边坡的几何模型

Fig. 2 The geometric model of slope

在算例分析中用 MADIAS/GTS 软件建立相应的三维边坡模型,假设其为非线性弹塑性的理想材料且土体服从 Mohr-Coulomb 屈服准则,为了得到符合实际的理想值,在分析过程中应用高次单元。单独对局部高应力的区域用自动线划分,单元长度节点间隔取值为 2,其他区域采用相应的自动实体划分,单元长度节点间隔取值为 4,只考虑其自重荷载。边界条件:前后两面 Y 轴水平位移约束,左右两面 X 轴水平位移约束,上面为自由边界,底面完全固定约束。当有限元划分时,用牛顿-拉普生法,最大试错次数 30,最大试迭代次数 50,取初始安全系数为 1.0 开始计算,收敛后增加一个安全系数增

量 0.1 重新开始计算,收敛后下一次计算未收敛时(或反之)将安全系数增量减少一半后重新计算,计算得到安全系数 F_s 。

2.2 正交试验设计方案

考虑到黏聚力、内摩擦角、坡角、坡高、土体容重、空隙水压比六个主要影响因素对边坡稳定性的影响。取这 5 个因素为研究对象,并对每个因素取 5 个水平进行正交分析。本文假定各因素之间无交互作用,采用 6 因素的正交表 $L_{25}(5^6)$ 进行正交试验。反之进行全面试验,则需要试验次数为 15 625,所以用正交表 $L_{25}(5^6)$ 来进行试验分析。正交试验方案及计算的结果如表 2 所示。根据各个因素相同水平的试验结果求出其极差。根据极差的大小排序得出安全系数影响的大小情况,得出影响试验的主要因素和次要因素。对表 2 的试验结果进行分析得到表 3。

表 2 正交试验方案与相对应的结果

Tab. 2 Orthogonal test scheme and the corresponding results

试验号	列号						安全系数 F_s	边坡状态(是否破坏)
	黏聚力 C / kPa	内摩擦角 φ (°)	坡角 β (°)	坡高 H / m	容重 / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙水压比 v_w		
1	0	0	20	10	16	0.1	0.100 0	是
2	0	10	30	50	17	0.2	0.212 5	是
3	0	20	40	100	18	0.3	0.412 5	是
4	0	30	50	200	19	0.4	0.462 5	是
5	0	40	60	250	20	0.5	0.637 5	是
6	50	0	30	100	19	0.5	0.100 0	是
7	50	10	40	200	20	0.1	0.287 5	是
8	50	20	50	250	16	0.2	0.337 5	是
9	50	30	60	10	17	0.3	0.412 5	是
10	50	40	20	50	18	0.4	1.812 5	否
11	100	0	40	250	17	0.4	0.100 0	是
12	100	10	50	10	18	0.5	0.162 5	是
13	100	20	60	50	19	0.1	0.412 5	是
14	100	30	20	100	20	0.2	1.287 5	否
15	100	40	30	200	16	0.3	1.412 5	否
16	150	0	50	50	20	0.3	0.100 0	是
17	150	10	60	100	16	0.4	0.137 5	是
18	150	20	20	200	17	0.5	0.712 5	是
19	150	30	30	250	18	0.1	0.862 5	是
20	150	40	40	10	19	0.2	0.962 5	是
21	200	0	60	200	18	0.2	0.100 0	是
22	200	10	20	250	19	0.3	0.387 5	是
23	200	20	30	10	20	0.4	0.687 5	是
24	200	30	40	50	16	0.5	0.812 5	是
25	200	40	50	100	17	0.1	0.637 5	是

根据表3可知,6个因素影响土质边坡稳定性大小顺序依次是:内摩擦角、坡角、黏聚力、容重、坡高、孔隙水压比。

表3 极差分析结果

Tab.3 The results of the range analysis

水平	因素					
	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	坡角 $\beta (^{\circ})$	坡高 H /m	容重 / $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙水压比 γ_w
K1	1.825	0.50	4.30	2.325	2.80	2.30
K2	2.95	1.1875	3.275	3.35	2.075	2.90
K3	3.375	2.5625	2.575	2.575	3.35	2.725
K4	2.775	3.8375	1.70	2.975	2.325	3.20
K5	2.625	5.4625	1.70	2.325	3.00	2.425
k1	0.365	0.10	0.86	0.465	0.56	0.46
k2	0.59	0.2375	0.655	0.67	0.415	0.58
k3	0.675	0.5125	0.515	0.515	0.67	0.545
k4	0.555	0.7675	0.34	0.595	0.465	0.64
k5	0.525	1.0925	0.34	0.465	0.6	0.485
极差	0.31	0.9925	0.52	0.205	0.255	0.18

2.3 基于尖点突变的突变级数法的运用

根据前面基于突变级数法对边坡稳定性的计算步骤依次进行计算,定性且定量好边坡的稳定性,为未来对边坡的防范措施做好相应的预警。

2.3.1 边坡的稳定性评判体系确定

本文基于边坡稳定性控制变量的6个因素划分为3大类,第一类是黏聚力 c 、内摩擦角 φ 的控制强度指标,第二类是坡角 β 、坡高 H 控制边坡几何参数的指标,第三类考虑土体的容重 γ 、孔隙水压比 γ_w 为主的控制外部荷载的指标。图3为其组织指标体系,其按照突变理论重点指标放前面的原则。

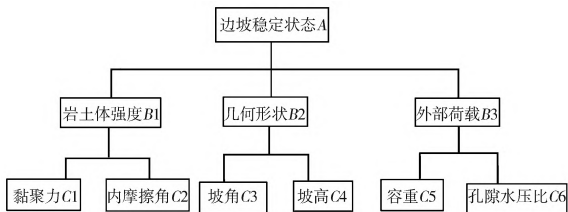


图3 组织指标体系

Fig.3 Organization index system

2.3.2 边坡稳定性评判因子的确定

本文根据上面表3对边坡25个试验的安全系数来计算其突变级数,并且比较其稳定状态,并根据突变级数对边坡稳定性进行分析。

2.3.3 对边坡底层因子效用函数值确定

根据表3采用折算法来求取边坡的突变级数指

标,相应的计算结果见表4。

表4 底层因子效用函数值

Tab.4 The underlying factor utility function value

编号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	突变级数A
1	0.00	0.00	0.33	0.04	0.80	0.20	0.00
2	0.00	0.25	0.50	0.20	0.85	0.40	0.561
3	0.00	0.50	0.67	0.40	0.90	0.60	0.63
4	0.00	0.75	0.83	0.80	0.95	0.80	0.674
5	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.707
6	0.25	0.00	0.50	0.40	0.95	1.00	0.500
7	0.25	0.25	0.67	0.80	1.00	0.20	0.751
8	0.25	0.50	0.83	1.00	0.80	0.40	0.804
9	0.25	0.75	1.00	0.04	0.85	0.60	0.699
10	0.25	1.00	0.33	0.20	0.90	0.80	0.831
11	0.50	0.00	0.67	1.00	0.85	0.80	0.595
12	0.50	0.25	0.83	0.04	0.90	1.00	0.699
13	0.50	0.50	1.00	0.20	0.95	0.20	0.836
14	0.50	0.75	0.33	0.40	1.00	0.40	0.831
15	0.50	1.00	0.50	0.80	0.80	0.60	0.891
16	0.75	0.00	0.83	0.20	1.00	0.60	0.658
17	0.75	0.25	1.00	0.40	0.80	0.80	0.865
18	0.75	0.50	0.33	0.80	0.85	1.00	0.831
19	0.75	0.75	0.50	1.00	0.90	0.20	0.875
20	0.75	1.00	0.67	0.04	0.95	0.40	0.699
21	1.00	0.00	1.00	0.80	0.90	0.40	0.707
22	1.00	0.25	0.33	1.00	0.95	0.60	0.831
23	1.00	0.50	0.50	0.04	1.00	0.80	0.699
24	1.00	0.75	0.67	0.20	0.80	1.00	0.836
25	1.00	1.00	0.83	0.40	0.85	0.20	0.875

2.3.4 边坡系统的指标的归一化计算

根据文献[10]可知尖点突变模型、燕尾突变模型的结构示意图(图4),所以 $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 、 $C4$ 、 $C5$ 、 $C6$ 构成尖点突变模型,相对应的 $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 构成燕尾突变模型。根据表5的各指标的效用函数,归一化进行计算其值,计算过程中遵循前面尖点突变理论的第四步原则,即是互补原则,采用求取平均值,而对于非互补采用大中取小。最终计算出的突变级数 A 见表4。下面用第一个样本的详细计算作为其阐述尖点突变的应用。

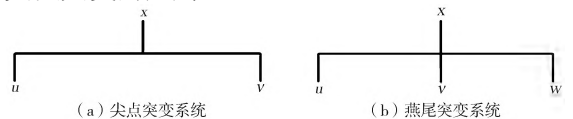


图4 本文应用的两种突变系统

Fig.4 Two kinds of catastrophe systems applied in this paper

对 $C1$ 、 $C2$ 有:

$$x_{c1} = (0)^{\frac{1}{2}} = 0, x_{c2} = (0)^{\frac{1}{3}} = 0$$

依据互补性原则, 采用平均值: $B_1 = 0$;

对 C_3 与 C_4 有:

$$x_{c3} = (0.33)^{\frac{1}{2}} = 0.574, x_{c4} = (0.04)^{\frac{1}{3}} = 0.342$$

依据非互补性原则, 采用大中取小: $B_2 = 0.342$;

对 C_5 、 C_6 有:

$$x_{c5} = (0.8)^{\frac{1}{2}} = 0.894, x_{c6} = (0.2)^{\frac{1}{3}} = 0.585$$

依据非互补性原则, 采用大中取小: $B_3 = 0.585$;

对 B_1 、 B_2 、 B_3 采用燕尾突变的归一公式得:

$$B_1 = (0)^{\frac{1}{2}} = 0$$

$$B_2 = (0.342)^{\frac{1}{3}} = 0.699$$

$$B_3 = (0.585)^{\frac{1}{4}} = 0.875$$

依据大中取小的原则, 取值 $A = 0$. 故第一个边坡其突变级数为 0, 以下的边坡依据以上计算所得突变级数依次列在表 4.

2.3.5 小结

为了使得结果可以更加直观、明了。把表 4 的结果显示见图 5, 此为边坡尖点突变级数与安全系数之间的关系, 从图中可以看出其突变级数的尖点即是波谷处边坡的稳定性是逐渐下降的, 若此时的 $F_s > 1.0$, 此时的边坡也不一定趋于稳定。可以看出根据传统的极限平衡法、有限元强度折减法数值分析等单一的得出安全系数对边坡稳定性进行判断的不足, 可以引入一些新的交叉学科和理论对边坡稳定性进行判断, 比如概率论与数理统计为基础的可靠性分析方法、以模糊数学为基础的模糊综合评价分析方法以及本文中引入尖点突变理论和有限元强度折减法相结合判断边坡稳定性, 更加趋于安全化、动态化、实用化。

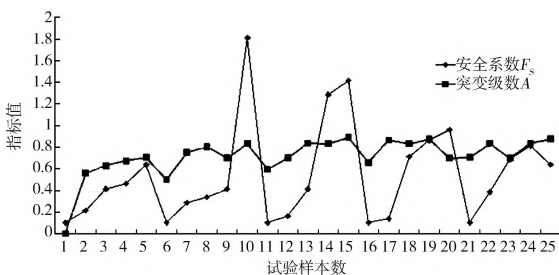


图 5 边坡突变级数与安全系数大小

Fig. 5 The catastrophe progression and safety factor of slope

3 工程实例

3.1 工程概况

某城市轨道交通 1 号线及 2 号线换乘站诚信路站, 对应里程桩号为 YDK4+ 139 800 至 YDK4+ 327. 000, 大厅区基坑边坡高度为 10~ 12 m, 车站地

面工程为 1 285~ 1 287 m, 1 号线轨道区基坑边坡高度 20~ 22 m, 2 号线轨道基坑边坡高度 25~ 27 m. 负 1 层为售票大厅, 负 2 层为 1 号线站台, 负 3 层为 2 号线站台, 1 号线轨道底板设计标高 1 267 m, 2 号线轨道底板设计标高为 1 260 m. 选取大厅的基坑边坡监测数据进行验证本文尖点突变理论对边坡稳定性判断的方法。

3.2 边坡监测

该边坡共布设 8 个变形监测点, 从 2012 年 9 月 6 日到 2012 年 10 月 13 日总共进行 38 次观测。具体数据如表 5 所示, 其中边坡 X 方向的最大变形量为 - 1. 7 mm, 平均变形速率为 - 0. 045 mm/d; Y 方向的最大变形量为 - 1. 2 mm, 平均变形速率为 - 0. 032 mm/d. 可知此边坡的变形是趋于稳定。

表 5 边坡监控数据实测值

Tab. 5 Measured values of slope monitoring data

	X 方向		Y 方向	
	累计变形值 /mm	平均速率 / (mm · d ⁻¹)	累计变形值 /mm	平均速率 / (mm · d ⁻¹)
1 号点	- 1. 3	- 0. 03	- 0. 6	- 0. 10
2 号点	- 0. 7	- 0. 03	- 1	- 0. 08
3 号点	- 1. 1	- 0. 03	- 0. 8	- 0. 03
4 号点	- 0. 9	- 0. 05	- 1. 1	0. 00
5 号点	- 0. 7	- 0. 10	- 0. 7	0. 13
6 号点	- 0. 9	- 0. 03	- 1. 1	- 0. 13
7 号点	- 0. 9	- 0. 08	- 0. 8	- 0. 03
8 号点	- 0. 9	- 0. 08	- 0. 9	- 0. 05

3.3 有限元强度折减法计算

其中大厅基坑边坡高度 10~ 12 m (模型中取 10 m), 土容重 $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, 坡角 $\beta = 50^\circ$, 弹性模量 $E = 8 \text{ MPa}$, 泊松比为 $\mu = 0. 3$, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, 黏聚力 $c = 20 \text{ kPa}$, 孔隙水压比 $\gamma_w = 0. 5$. 用 MADIAS/GTS 建立相应的三维边坡模型, 共划分网格单元 6 839, 节点数 1 502. 最后计算出其安全系数 $F_s = 0. 587 5$, 其 F_s 小于 1.

从上文实际监测数据可知该边坡是趋于稳定的, 而如果仅仅根据有限元强度折减法计算出的安全系数来判断边坡的稳定性与实际工程监测得出的结论不相符合, 所以可以知道用单一的安全系数来作为判断边坡稳定性的依据的局限性。

3.4 尖点突变理论的应用

采用折算法求取工程实例中底层因子效用函数值, 内摩擦角 $C_2 = 0. 75$, 黏聚力 $C_1 = 0. 10$, 坡角 $C_3 = 0. 83$, 坡高 $C_4 = 0. 04$, 容重 $C_5 = 0. 85$, 孔隙水

压比 $C6=1.00$ 。计算求得 $A=0.681$ 。故工程实例中的边坡突变级数为 0.681 。根据文献[10]中由突变级数的大小将边坡分为稳定、亚稳定、不稳定三种状态,其中突变级数小于 0.55 ,边坡属于不稳定状态,突变级数介于 0.55 到 0.80 时边坡属于亚稳定状态,突变级数大于 0.80 时边坡属于稳定状态。本工程计算出的边坡的突变级数 $A=0.681 > 0.550$,所以边坡是趋于亚稳定状态。

4 结论

(1) 通过正交试验设计原理采取优化实验方案,采用正交表 $L_{25}(5^6)$ 来安排实验,基于强度折减法进行对边坡稳定性进行定量算出其 F_s 的值,然后运用极差分析,得出 6 个因素影响土质边坡稳定性大小顺序依次是:内摩擦角、坡角、黏聚力、容重、坡高、孔隙水压力。

(2) 在六个影响边坡稳定性的因素作用下求得边坡稳定性安全系数,然后利用突变理论与模糊数学相结合产生突变模糊隶属函数,用归一公式进行综合量化运算归一为一个参数(即总的隶属函数),从而对边坡稳定性进行综合评价。

(3) 并与工程实例中监控数据所判断的边坡稳定性进行对比分析,进一步可推断基于单一的有限元强度折减法计算出的稳定安全系数在判别边坡稳定性方面的局限性,而依据有限元强度折减法与尖点突变理论相结合可以更好的判断边坡的稳定性,更加趋于安全化、动态化、实用化。

参考文献(References):

- [1] 张永兴. 边坡工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (ZHANG Yongxing. Slope engineering[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2008. (in Chinese))
- [2] Griffiths DV, Lane PA. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geo technique, 1999, 49(3): 387-403.
- [3] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝, 等. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[C]. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 2002. (ZHENG Ying ren, ZHAO Shang-yi, ZHANG Lu-yu, et al. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[C]. China of rock mechanics and Engineering Institute of the seventh academic conference proceedings. 2002. (in Chinese))
- [4] 郑颖人, 赵尚毅, 宋雅坤. 有限元强度折减研究进展[J]. 后勤工程学报, 2005(3): 1-6. (ZHENG Ying ren, ZHAO Shang-yi, SONG Ya-kun. Finite element strength reduction[J]. Journal of Research Progress of Logistic Engineering. 2005(3): 1-6. (in Chinese))
- [5] 陈国庆, 黄润秋, 石豫川, 等. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报. 2014, 33(2): 243-256. (CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, SHI Yuchuan, et al. Dynamic and overall slope stability analysis based on strength reduction method[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2014, 33(2): 243-256. (in Chinese))
- [6] 肖锐铨, 王思敏, 贺小黑, 等. 基于局部强度折减法的大型边坡安全度分区[J]. 岩石力学与工程学报. 2014, 33(增2): 3928-3937. (XIAO Ruihua, WANG Siming, HE Xiaohai, et al. The safety of local large slope based on strength reduction method[J]. Journal of rock mechanics and Engineering. 2014, 33(2): 3928-3937. (in Chinese))
- [7] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理. 2010, 27(9): 52-55. (LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Congwei, et al. The orthogonal experimental design and study on the method[J]. Experimental Technology and Management. 2010, 27(9): 52-55. (in Chinese))
- [8] 陈魁. 应用概率统计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. (CHEN Kui. Application of probability and statistics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese))
- [9] 王思长, 折学森, 李毅, 等. 基于尖点突变理论的岩质边坡稳定性分析[J]. 交通运输工程学报. 2010, 10(3): 24-27. (WANG Sichang, ZHE Xuesen, LI Yi, et al. Stability analysis of rock slope based on Catastrophe Theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2010, 10(3): 24-27. (in Chinese))
- [10] 梁桂兰, 徐卫亚, 何育智, 等. 突变级数法在边坡稳定综合评判中的应用[J]. 岩土力学. 2008, 29(7): 1895-1899. (LIANG Guilan, XU Weiya, HE Yuzhi, et al. Application of catastrophe progression method to comprehensive evaluation of slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics. 2008, 29(7): 1895-1899. (in Chinese))
- [11] 潘岳, 李爱武, 戚云松. 对"突变级数法在边坡稳定综合评判中的应用"的讨论[J]. 岩土力学. 2009, 30(1): 285-288. (PAN Yue, LI Aiwu, QI Yunsong. Discussion of "catastrophe progression method in comprehensive evaluation of slope stability application" [J]. Geomechanics. 2009, 30(1): 285-288. (in Chinese))
- [12] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (FENG Xiating. Introduction to Intelligent Rock Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [13] 魏雪莲, 赵惠燕, 刘光祖, 等. 害虫种群动态模型的燕尾突变分析[J]. 生态学报. 2009, 29(10): 5478-5484. (WEI Xuelian, ZHAO Huiyan, LIU Guangzhu, et al. Mutation analysis of pest population dynamic model Swallowtail [J]. Journal of Ecology. 2009, 29(10): 5478-5484. (in Chinese))
- [14] 孙强, 马平, 冶小平, 等. 斜坡演化的燕尾突变模型研究[J]. 岩土工程学报. 2008, 30(7): 1024-1028. (SUN Qiang, MA Ping, YE Xiaoping, et al. Mutation model of slope evolution dovetail [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2008, 30(7): 1024-1028. (in Chinese))
- [15] 王登科. 含瓦斯煤岩本构模型与失稳规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. (WANG Dengke. Research and destabilization regularity of constitutive model of coal containing gas [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese))

(下转第 168 页)

- ston, V A, 2009: 1-7.
- [13] SWRR (Sustainable Water Resources Roundtable). Sustainable Water Resources Roundtable Report[R]. SWRR, 2010.
- [14] Kang M G, Lee G M. Multicriteria Evaluation of Water Resources Sustainability in the Context of Watershed Management[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2011, 47(4): 813-827.
- [15] 左其亨, 张云, 林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 440-447. (ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human water harmony[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 440-447. (in Chinese))
- [16] 傅春, 占少贵, 章无恨. 南昌市水环境安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 23-27. (FU Chun, ZHAN Shaogui, ZHANG Wu hen. Assessment of water environment security in Nanchang[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 23-27. (in Chinese))
- [17] 施春红, 胡波. 城市供水安全综合评价探讨[J]. 资源科学, 2007, 29(3): 80-85. (SHI Chun hong, HU Bo. Synthetically evaluating the security of urban water supply[J]. Resources Sciences, 2007, 29(3): 80-85. (in Chinese))
- [18] 王远坤, 夏自强, 曹升乐. 水安全综合评价方法研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 35(6): 618-621. (WANG Yuan kun, XIA Zi qiang, CAO Sheng le. Comprehensive evaluation method for water security[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 35(6): 618-621. (in Chinese))
- [19] 卢敏, 张展羽, 石月珍. 集对分析法在水安全评价中的应用研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 505-508. (LU Min, ZHANG Zhanyu, SHI Yue zhen. Application of set pair analysis to evaluation of water safety[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(5): 505-508. (in Chinese))
- [20] 汪红洲, 段衍衍, 傅春. 基于层次分析的安徽省水安全综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 37-41. (WANG Hongzhou, DUAN Yanyan, FU Chun. Water security evaluation of Anhui province based on analytic hierarchy process[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 37-41. (in Chinese))
- [21] 黄昌硕, 耿雷华, 王立群, 等. 中国水资源及水生态安全评价[J]. 人民黄河, 2010, 32(3): 14-16. (HUANG Changshuo, GENG Lehua, WANG Liqun. Evaluation on China water resources and water ecological security[J]. Yellow River, 2010, 32(3): 14-16. (in Chinese))
- [22] 李雪松, 李婷婷. 水安全综合评价研究—基于中国 2000-2012 年宏观数据的实证分析[J]. 中国农村水利水电, 2015, (3): 45-49. (LI Xuesong, LI Tingting. Water security evaluation: an empirical analysis based on Chinese macroscopical data from 2000 to 2012[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015, (3): 45-49. (in Chinese))
- [23] 江红, 杨小柳. 基于熵权的亚太地区水安全评价[J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 373-380. (JIANG Hong, YANG Xiaoliu. Entropy weight based water security assessment in Asia Pacific[J]. Progress in Geography, 34(3): 373-380. (in Chinese))
- [24] Fengshun Yang, Dongguo Shao, Chun Xiao, et al. Assessment of Urban Water Security based on Catastrophe Theory[J]. Water Science and Technology, 2012, 66(3): 487-493.

(上接第 143 页)

- [16] 姜永东, 鲜学福, 杨钢, 等. 层状岩质边坡的尖点突变模型[J]. 重庆大学学报. 2008, 31(6): 677-682. (JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, YANG Gang, et al. The cusp catastrophe model of layered rock slope[J]. Chongqing University. 2008, 31(6): 677-682. (in Chinese))
- [17] Thom R. Stabilité Structurelle et Morphogenèse. Benjamin W A, Reading, Mass: Benjamin, 1972.
- [18] Thom R. Structural stability and morphogenesis(translate by Fowler G H) [M]. New York: Benjamin Addison Wesley, 1975.
- [19] Thompson J M T, Hunt G W. Instabilities and catastrophes and catastrophes in science and engineering[M]. Chichester: Wiley, 1982.
- [20] Thompson J M T, Zeeman E C. Classification of elementary catastrophes of codimension ≤ 5 . Structural Stability, the Theory of Catastrophes and Application in the Sciences. Lecture Notes in Mathematics 525. Berlin: Springer Verlag, 1976, 263-327.
- [21] Zeeman E C. Catastrophes Theory: Selected Papers(1972-1975), Addison Wesley, Mass, 1977.
- [22] Zeeman E C. Bifurcation, catastrophes and turbulence. New Directions in Applied Mathematics. New York: Springer Verlag, 1982, 105-153.
- [23] Poston T, Stewart I. Catastrophe theory and its application[M]. London: Pitman, 1978.